УДК 621.372.54

Д.В. БОНДАРЬ, канд. техн. наук, А.Н. ЗЕЛЕНИН, канд. техн. наук, А.И. КОСТРОМИЦКИЙ

АНАЛИЗ АКТИВНОГО КОРРЕКТОРА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

При создании формирующих фильтров и корректоров частотных характеристик находят широкое применение цепи, имеющие характеристику корректора Боде (рис. 1). Аналитическое выражение для передаточной функции корректора Боде имеет вид:

$$H(p)=H_0\left[p^2+p\frac{\omega_0}{Q}\alpha+\omega_0^2\right]\Big/\left[p^2+p\frac{\omega_0}{Q}(1-\alpha)+\omega_0^2\right], \tag{1}$$

где H_0 — постоянное основное усиление; ω_0 — центральная частота корректора; Q — добротность корректора; α — параметр регулирования подъема-спада АЧХ корректора на центральной частоте [1].

Параметр α принимает любые значения из промежутка от 0 до 1, причем, при $\alpha=1$ значение АЧХ на частоте ω_0 устремляется к бесконечности, а при $\alpha=0$ значение АЧХ на частоте ω_0 равно нулю. По этой причине на практике приходится ограничивать диапазон изменения параметра α величинами α_{max} и α_{min} в соответствии с желаемыми значениями подъема (H_{max}) и спада (H_{min}) АЧХ на центральной частоте [1].

Вид АЧХ и ФЧХ корректора Боде при изменении параметра α от некоторого минимального до некоторого максимального значения показан на рис. 1.

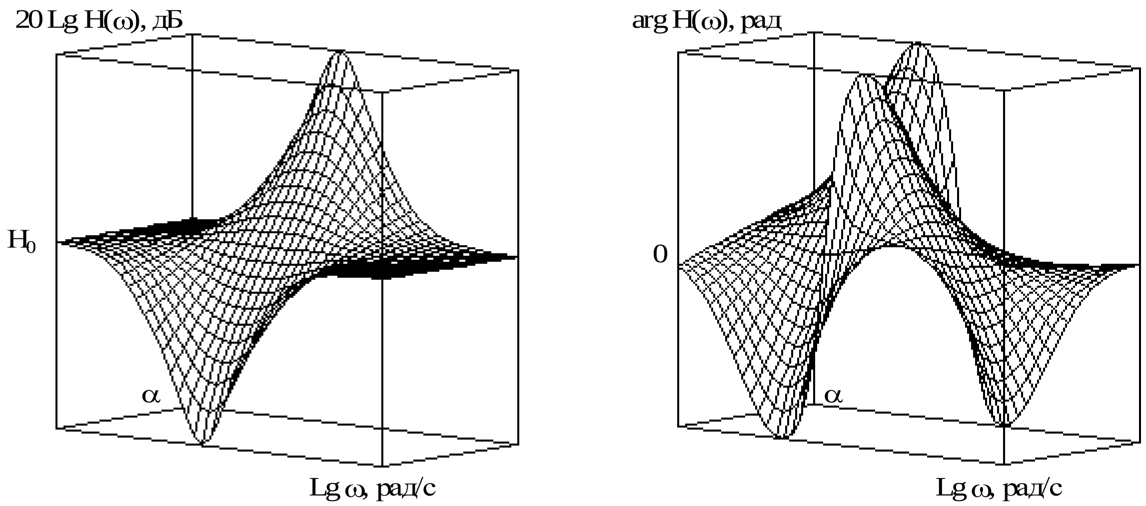

Рис. 1

Передаточной функции (1) соответствует звено второго порядка, которое может быть построено на основе операционного усилителя, в специализирующей цепи которого включен последовательный колебательный контур, выполняющий функции режекторного звена (рис. 2). Последовательный *R-L-C*-колебательный контур, собранный на элементах R_2, L, C, формирует резонансный характер передаточной функции $H(p)$, а потенциометр R_1 служит органом управления, который влияет на величину подъема или спада АЧХ на резонансной (центральной) частоте. Мерой регулирования в данном случае служит параметр α', показывающий перераспределение сопротивлений плеч потенциометра R_1. Количественно перераспределение сопротивлений плеч потенциометра R_1 задается соотношением:

$$R_1=(1-\alpha')R_{11}+\alpha' R_{12},$$

где R_{11} и R_{12} — сопротивления соответствующих участков регулировочного потенциометра R_1.

Регулировочный параметр α' изменяется в пределах от 0 до 1.

На первом этапе анализа схемы (рис. 2) необходимо вывести выражение для ее передаточной функции. Затем следует выяснить, как связаны параметры корректора Боде (1) со значениями номиналов пассивных элементов рассматриваемой схемы.

Передаточную функцию цепи получим при помощи топологического метода анализа линейных электрических цепей. В соответствии с этим методом обобщенный сигнальный граф анализируемой цепи состоит из пяти вершин и восьми связывающих их дуг (рис. 3).

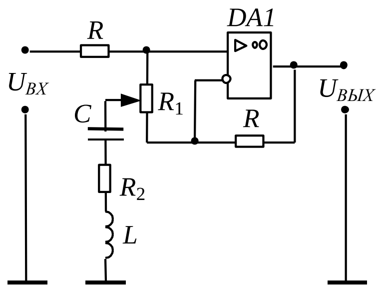

Рис. 2

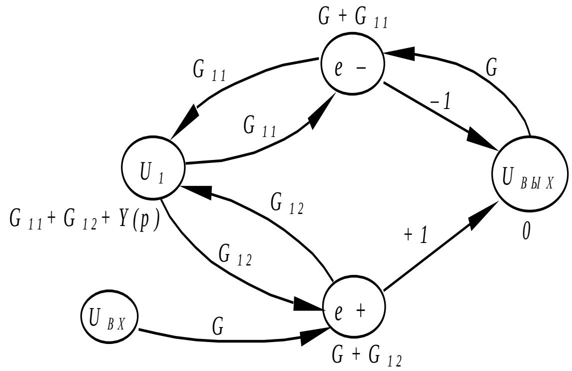

Рис. 3

Веса вершин и дуг связаны с проводимостями пассивных элементов схемы. Переменная $Y(p)$ представляет собой проводимость последовательного контура:

$$Y(p) = 1/Z(p) = pC\big/(p^2LC + pCR_2 + 1)\,. \tag{2}$$

Коэффициент передачи графа от вершины U_{BX} к вершине $U_{ВЫХ}$, вычисляемый по формуле Мезона [2, 3], совпадает с передаточной функцией анализируемой цепи и определяется соотношением:

$$H(p) = \frac{\alpha'(1-\alpha')Z(p) + \alpha'(1-\alpha')R_1 + \alpha'(1-\alpha')R_2 + \alpha' R}{\alpha'(1-\alpha')Z(p) + \alpha'(1-\alpha')R_1 + \alpha'(1-\alpha')R_2 + (1-\alpha')R}\,. \tag{3}$$

Эта формула уточняет соотношение (11.3.9) [1].

Подставим выражение (2) в (3), приведем подобные и получим следующее выражение для передаточной функции анализируемого устройства:

$$H(p) = \frac{p^2 + p\dfrac{1}{L}\left(R_1 + R_2 + R\dfrac{1}{1-\alpha'}\right) + \dfrac{1}{LC}}{p^2 + p\dfrac{1}{L}\left(R_1 + R_2 + R\dfrac{1}{\alpha'}\right) + \dfrac{1}{LC}}\,, \tag{4}$$

где α' — параметр, характеризующий соотношение сопротивлений плеч потенциометра.

Приравняв коэффициенты при соответствующих степенях комплексной переменной p в формулах (1) и (4), получим соотношения:

$$H_0 = 1, \tag{5}$$

$$\omega_0 = 1\big/\sqrt{LC}\,, \tag{6}$$

$$Q = \alpha'(1-\alpha')\sqrt{L/C}\big/\left[2\alpha'(1-\alpha')(R_1+R_2) + R\right], \tag{7}$$

$$\alpha = \alpha'\left[(1-\alpha')(R_1+R_2) + R\right]\big/\left[2\alpha'(1-\alpha')(R_1+R_2) + R\right]. \tag{8}$$

Формулы (5) – (8) позволяют заключить следующее:

1. Постоянное основное усиление цепи, независящее от номиналов пассивных элементов схемы и параметра регулирования α', есть величина постоянная, равная единице во всем диапазоне частот.

2. Центральная частота корректора, выполненного по схеме рис. 2, задается только значениями индуктивности и емкости последовательного колебательного контура и не зависит от параметра регулирования α'.

3. Добротность корректора зависит от значений всех элементов схемы и, в том числе, - от положения движка потенциометра R_1 (от α').

4. Параметр регулирования подъема-спада теоретической АЧХ корректора Боде определяется соотношением значений всех резисторов схемы. Соответствие α и α' определяется нелинейной дробно-рациональной зависимостью.

Как добротность схемы, так и параметр регулирования подъема-спада АЧХ цепи нелинейно зависят от соотношения сопротивлений плеч управляющего потенциометра. Выясним, существует ли такое соотношение номиналов цепи, при котором выполнялись бы условия:

$$\alpha = \alpha', \qquad Q = const.$$

С этой целью перепишем формулы (7) и (8) в виде:

$$\alpha = \alpha'\left[(1-\alpha')\delta+1\right]/\left[2\alpha'(1-\alpha')\delta+1\right], \tag{9}$$

$$Q = \left\{\alpha'(1-\alpha')/\left[2\alpha'(1-\alpha')\delta+1\right]\right\}\sqrt{L/C}\,/R, \tag{10}$$

где δ — параметр, характеризующий соотношение значений сопротивлений схемы, вычисляемый по формуле:

$$\delta = (R_1 + R_2)/R.$$

Если предположить, что параметр $\delta << 1$, то первыми слагаемыми в числителе выражения (9) и знаменателе выражений (9) и (10) можно пренебречь и тогда:

$$\alpha \approx \alpha', \tag{11}$$

$$Q \approx \alpha'(1-\alpha')\sqrt{L/C}\,/R. \tag{12}$$

Выражения (11) и (12) показывают, что при выполнении условия $\delta << 1$ величина подъема-спада АЧХ схемы с достаточной степенью точности задается соотношением сопротивлений плеч потенциометра R_1 (параметр α'), однако зависимость добротности схемы от положения движка потенциометра близка к квадратичной с максимумом при $\alpha' = 0{,}5$ (рис. 4).

Если предположить, что параметр $\delta >> 1$, то единицей в числителе выражения (9) и знаменателе выражений (9) и (10) можно пренебречь и переписать их в виде:

$$\alpha \approx 0{,}5, \qquad Q \approx \sqrt{L/C}\,/2\delta R.$$

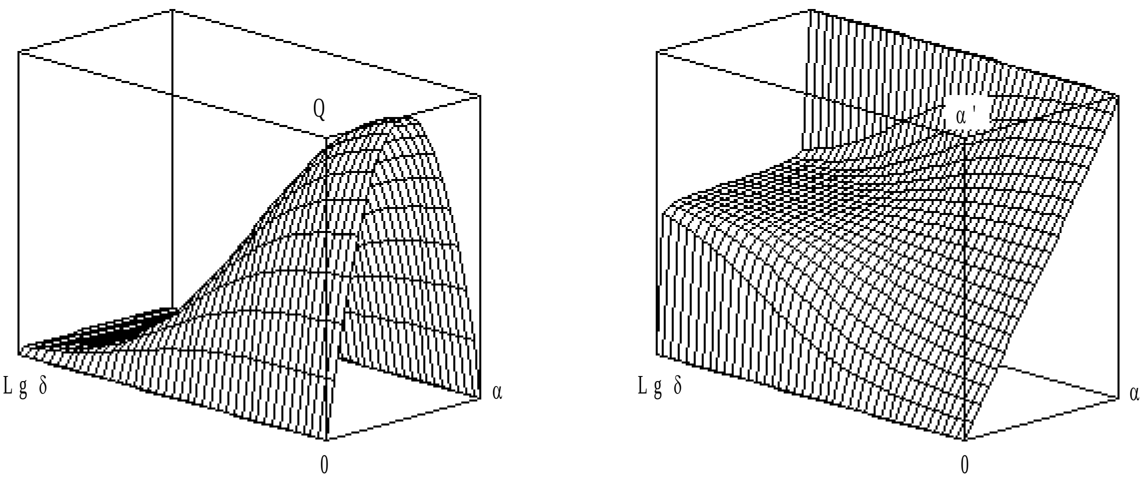

Рис. 4

В данном случае удается достичь постоянства добротности цепи. Но в то же самое время теряется возможность влиять на подъем и спад АЧХ. Более того, параметр регулирования α имеет значение 0,5, при котором АЧХ не изменяется во всем частотном диапазоне и равна H_0 (ФЧХ также постоянна и равна нулю).

На рис. 4 приведены графические зависимости добротности и параметра регулирования подъема-спада АЧХ корректора Боде от параметров δ и α'.

Учитывая вышеизложенное, можно заключить, что цепь (рис. 2) имеет близкие к корректору Боде характеристики при $\delta << 1$.

Расчет номиналов пассивных элементов схемы при этом можно производить по следующей методике:

- задавшись значением индуктивности (емкости), рассчитать значение емкости (индуктивности) по требуемой центральной частоте в соответствии с формулами:

$$C = 1/\omega_0\sqrt{L}\,, \qquad L = 1/\omega_0\sqrt{C}\,.$$

- задавшись значением параметра $\delta << 1$, по требуемым α_{max} или α_{min} и добротности при максимальном подъеме (или спаде) АЧХ корректора вычислить номинал резистора R по одной из формул:

$$R = \{\alpha_{max}(1-\alpha_{max})/[2\alpha_{max}(1-\alpha_{max})\delta+1]\}\cdot\left(\sqrt{L/C}/Q\right),$$
$$R = \{\alpha_{min}(1-\alpha_{min})/[2\alpha_{min}(1-\alpha_{min})\delta+1]\}\cdot\left(\sqrt{L/C}/Q\right).$$

- задавшись значением R_1 (или R_2), вычислить номинал резистора R_2 (или R_1) по формулам:

$$R_2 = \delta R - R_1, \qquad R_1 = \delta R - R_2.$$

При использовании анализируемой цепи, например, в качестве базового звена эквалайзера в устройствах звукотехники, следует помнить о имеющей место зависимости добротности Q от параметра регулирования α'.

Список литературы: 1. *Шкритек* П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике: Пер. с нем. М.: Мир, 1991. 446 с. 2. *Зеленин А.Н., Костромицкий А.И., Бондарь Д.В.* Активные фильтры на операционных усилителях. Харьков: Телетех, 2000. 136 с. 3. *Анисимов В.И.* Топологический расчет электронных схем. М.: Энергия, 1977. 240 с.

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию (20.12.00)